

УДК 621.9.06:629.735.45

Ю.А. ПРОСКОРЯКОВА

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОБРАБОТКИ

Статья посвящена исследованию процесса центробежной обработки деталей машин. Разработаны теоретические модели для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости, глубины упрочненного слоя и степени упрочнения. Предложена методика проектирования технологических процессов центробежной обработки.

Ключевые слова: центробежная обработка, методика проектирования технологических процессов, теоретическое моделирование, качество обработанной поверхности.

Введение. Центробежная обработка (ЦО) является одним из упрочняющих динамических методов обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). Этот метод применяют для повышения усталостной прочности деталей машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации.

В результате центробежного упрочнения снижаются высотные параметры шероховатости, возрастает радиус вершин и впадин микронеровностей, увеличивается относительная опорная длина профиля на начальных участках, создается ненаправленная структура микронеровностей, создаются сжимающие остаточные напряжения и наклеп поверхностного слоя. Формирование таких параметров поверхностного слоя обеспечивает повышение эксплуатационных свойств деталей, таких как усталостная долговечность и прочность, износостойкость и контактная жесткость.

К основным преимуществам ЦО относятся: высокая интенсивность обработки, простое по конструкции оборудование, возможность обработки длинномерных маложестких изделий сложной формы, большая энергия воздействия на поверхность детали, что позволяет получать высокую степень упрочнения для стальных деталей.

Процесс упрочнения центробежным способом не изменяет геометрической формы детали, поэтому не требуется специального припуска на обработку. От чистоты исходной поверхности зависит поверхностная твердость. В случае грубо подготовленной поверхности гребешки препятствуют ударному воздействию шариков на основной слой металла.

Этот метод основан на принципе динамического удара шариков об обрабатываемую поверхность. Здесь используется центробежная сила стальных шариков диаметром 7-20 мм, свободно сидящих в радиальных отверстиях быстро вращающегося диска.

Рабочие элементы под действием центробежных сил занимают крайнее положение в радиальных отверстиях, а при ударе об обрабатываемую поверхность опускаются, отдавая энергию, создаваемую центробежной силой. Микрорельеф поверхности образуется путём наложения и пересечения единичных следов (лунок).

Схема центробежного наклепа показана на рис.1. При способление для упрочнения заготовки 1 включает сепаратор 3 с рядом конических отверстий по периферии, в которых находятся шарики 2. При быстром вращении центробежная сила стремится выбросить шарики из сепаратора, но они могут выдвигаться из своих гнезд лишь на определенную величину и производить наклеп поверхности. Заготовка вращается по стрелке A со скоростью 30-90 м/мин, а упрочнитель – по стрелке B со скоростью 20-40 м/с. Такое направление вращения заготовки и упрочнителя увеличивает силу удара шариков и повышает эффект упрочнения. В зависимости от режимов и условий обработки сепаратор может закрепляться либо на шпинделе шлифовального станка, либо получать вращение от автономного двигателя.

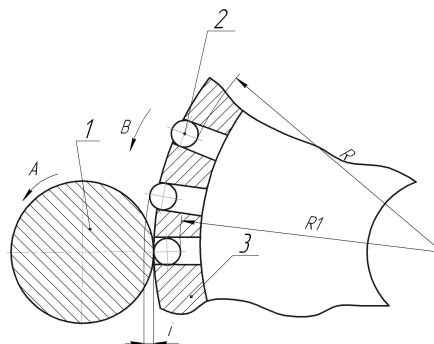


Рис.1. Схема центробежного наклепа

Необходимый натяг i обеспечивается вследствие установки упрочнителя на определенном расстоянии от заготовки при помощи поперечного винта суппорта или стола станка [1].

Упрочняемую поверхность перед началом обработки следует смазать керосином. Сепаратор приспособления с шариками смазывается составом из веретенного масла с 60% керосина через каждые 5-10 мин. Смазку можно производить на ходу с помощью волосяной щетки, при этом не происходит заметного торможения шарика сепаратором, и процесс протекает равномерней. Обработка наружных поверхностей производится на токарных, шлифовальных и других станках как общего, так и специального назначения.

Упрочняемую поверхность перед началом обработки следует смазать керосином. Сепаратор приспособления с шариками смазывается составом из веретенного масла с 60% керосина через каждые 5-10 мин. Смазку можно производить на ходу с помощью волосяной щетки, при этом не происходит заметного торможения шарика сепаратором, и процесс протекает равномерней. Обработка наружных поверхностей производится на токарных, шлифовальных и других станках как общего, так и специального назначения.

Параметры центробежной обработки следующие: V - окружная скорость упрочнителя, м/с; i - натяг; Z - число шариков в сепараторе; $d_{ш}$ - диаметр шариков, мм; v_d - окружная скорость обрабатываемой детали, м/с; S_o - продольная подача, мм/об; k - число рабочих ходов; m_{\odot} - масса рабочего элемента (шарика), кг; D - наружный диаметр упрочнителя, мм; d - диаметр обрабатываемой поверхности детали, мм. Достижимая глубина наклепа от 0,4 до 1,5 мм, шероховатость может достигать 0,16 мкм [2].

Постановка задачи. При исследовании основных технологических параметров ЦО (производительности процесса и качества обработанной поверхности) одним из важнейших является вопрос теоретического моделирования процесса единичного взаимодействия стальных полированных шариков с поверхностью обрабатываемой детали. Разработка теоретических зависимостей, описывающих форму и размеры следов обработки, позволит в дальнейшем перейти к теоретико-вероятностному описанию распределения следов на поверхности детали, что, в свою очередь, даёт возможность разработать модель формирования профиля шероховатости и физико-механических свойств поверхности детали.

Для построения модели процесса единичного взаимодействия при

ЦО воспользуемся методикой Е.Ф. Непомнящего [3] при исследовании трения и износа под действием потока твёрдых сферических частиц. Поверхность обрабатываемой детали сначала будем рассматривать как гладкую, без учёта шероховатости.

Известно, что при косом ударе пятно контакта шарика будет представлять собой эллипс с большой и малой полуосями a и b соответственно. Величину малой полуоси b можно определить из геометрической схемы внедрения шарика в поверхность детали в поперечном направлении (рис.2).

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}, \quad (1)$$

где R - радиус шарика; h_{\max} - максимальная глубина внедрения шарика.

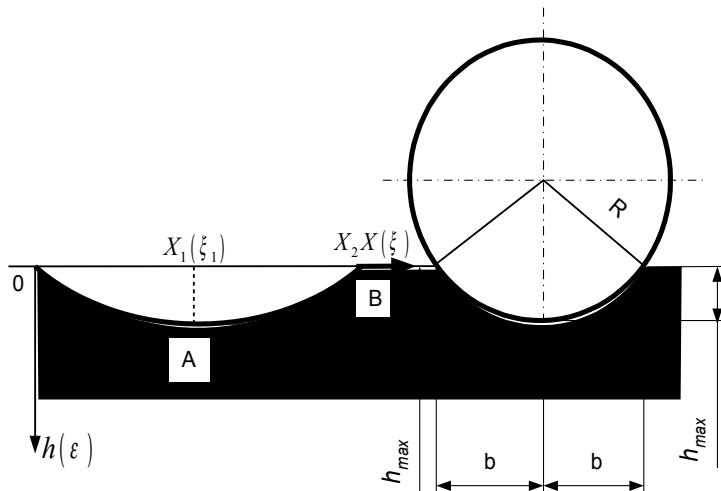


Рис.2. Геометрическая схема процесса внедрения шарика

Учитывая длину траектории следа, а также то, что на глубине h_{\max} шарик оставляет отпечаток диаметром $2b$, получим:

$$a = \frac{\pi}{2} (\operatorname{ctg} \alpha - f) h_{\max} + b, \quad (2)$$

где α - угол встречи шарика с поверхностью детали; f - коэффициент трения шарика по поверхности детали.

Таким образом, размеры полуосей определяются по формулам (2) и (1). В соответствии с методикой Е.Ф. Непомнящего получена зависимость для расчета максимальной глубины внедрения шарика h_{\max} :

$$h_{\max} = 2 \omega R_c R \sin \alpha \sqrt{\frac{\rho_u}{3 k_s c \sigma_s}}, \quad (3)$$

где R_c - радиус сепаратора; ω - угловая скорость вращения сепаратора; ρ_u - плотность материала шарика; k_s - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости детали; c - коэффициент несущей способности контактной поверхности; σ_s - предел текучести матери-

ала детали.

Как указывалось выше, одной из главных задач при проектировании технологических процессов является расчет параметров шероховатости обработанной поверхности. При ЦО, как и при других динамических методах обработки ППД, изменение шероховатости происходит от исходной до некоторой характерной для данного метода с конкретными технологическими режимами шероховатости, получившей название установившейся. Профиль установившейся шероховатости образуется в результате пересечения и наложения следов единичного взаимодействия. При дальнейшей обработке такая шероховатость воспроизводится в течение определенного времени, вплоть до появления перенаклепа.

В работе А.В. Королёва [4] предложено теоретико-вероятностное описание формирования шероховатости обрабатываемой поверхности при различных видах абразивной обработки. Подобное описание можно применить и для динамических методов обработки ППД.

В результате проведения теоретических исследований получена зависимость для определения среднего арифметического отклонения установившейся шероховатости поверхности

$$R_{a\text{ усм}} = 0,23 \sqrt{\frac{h_{\max} \times l_{eo}}{n \times z_p}}, \quad (4)$$

где n - число оборотов диска упрочнителя в минуту; z_p - число шариков в одном ряду упрочнителя; l_{eo} - единичная длина.

Удары шариков вызывают в зоне контакта с обрабатываемой деталью местную упругую, а также пластическую деформации. Упругие деформации связаны с такими изменениями формы детали и её поверхностного слоя, которые после снятия внешней нагрузки исчезают. Пластические деформации вызывают постоянные изменения формы детали или ее объема, которые не исчезают после устранения внешней нагрузки. Различие этих видов деформации имеет основополагающее значение при анализе процесса ППД и его последствий в поверхностном слое детали.

Из теории пластической обработки известно, что пластическая деформация наступает в результате скольжения, протекающего в кристаллической решетке материала. Во время деформации кристаллы дробятся на фрагменты и блоки с большим искажением кристаллической решетки. Этот процесс протекает до определенного граничного состояния, зависящего от рода обрабатываемого материала. Если уровень дефектов достигает граничной величины, то способность кристаллической решетки к дальнейшей деформации исчерпывается. В таком случае дальнейшая обработка приводит к измельчению зерен или к перемещению кристаллитов относительно друг друга, что способствует возникновению несплошностей в материале в виде микротрещин.

При проектировании технологических процессов центробежной обработки важное значение имеет аналитический расчет ожидаемого значения толщины упрочненного слоя и степени упрочнения. От глубины упрочненного слоя h_u зависят многие эксплуатационные свойства деталей,

например, усталостная прочность и долговечность. Величина h_n определяет зону поверхностного слоя, в которой имеются остаточная деформация зерен и дислокаций кристаллической решетки, образованные в результате приложения внешней нагрузки. Аналитическое определение толщины упрочненного слоя и степени упрочнения в зависимости от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса является очень сложной задачей. Существующие математические зависимости, выведенные несколькими авторами, были получены на основе теории упругости или пластичности после принятия многочисленных упрощений и допущений. Значительные исследования в этой области проведены И.В. Кудрявцевым, В.П. Пшибыльским, Е.Г. Коноваловым, Д.Д. Папшевым и др.

В работе И.В. Кудрявцева [5] приведена зависимость для определения глубины наклепанного слоя в зависимости от характеристик следа:

$$h_n = 3rk,$$

где k - коэффициент, зависящий от степени наклепа; r - радиус пластического отпечатка.

В случае эллиптической формы отпечатка

$$r = \sqrt{ab},$$

где a и b - полуоси эллипса контакта. Для ЦО они определяются по формулам (1) и (2).

Тогда

$$r = \sqrt{\frac{\pi}{2} (ctg\alpha - f) h_{\max} + b \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}}. \quad (5)$$

Следовательно, для ЦО глубину упрочненного слоя можно определить по формуле

$$h_n = 3k \sqrt{\frac{\pi}{2} (ctg\alpha - f) h_{\max} + b \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}}. \quad (6)$$

В вышеуказанной работе [5] также приводится зависимость для определения степени упрочнения ε . Используя эту зависимость для ЦО, можно получить следующую формулу:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{2} (ctg\alpha - f) h_{\max} + b \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}}}{R}. \quad (7)$$

Одним из важнейших технологических параметров является время обработки. При ЦО оно зависит от длины обрабатываемой детали, продольной подачи, необходимого числа ударов по единице обрабатываемой поверхности, определяемого числом рабочих ходов упрочнителя и может быть определено по зависимости

$$t = \frac{l_o}{S_0 n_o k}, \quad (8)$$

где L_o - длина детали, мм; S_o - подача инструмента, мм/об; n_o - число оборотов детали в мин; k - число рабочих ходов.

Таким образом, в результате теоретических исследований процесса ЦО получены все зависимости, необходимые для технологического проектирования (глубина наклепанного слоя, степень упрочнения, шероховатость обработанной поверхности и время обработки).

Результаты эксперимента. Для проверки адекватности полученных зависимостей были проведены комплексные экспериментальные исследования центробежной обработки.

Эксперименты проводились в заводских условиях на предприятии ОАО «Роствертол» на специальном токарном станке 163 с некоторыми изменениями, отвечающими требованиям технологического процесса, где вместо резца используется приспособление для ротационного наклепа: заготовка вращается в центрах вокруг своей оси, приспособление – упрочнитель со скоростью подачи движется вдоль оси заготовки. При этом использовались двухрядные и пятирядные сепараторы.

Для определения шероховатости поверхности использовались цилиндрические и призматические образцы. Материалы образцов – сталь 40ХДСА, 40ХН2МА, 38ХГН.

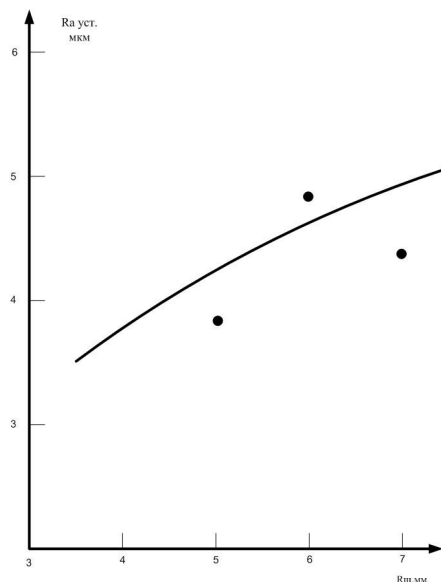


Рис.3 Зависимость установившейся шероховатости поверхности от радиуса шариков в упрочнителе для стали 40ХН2МА:

— - теоретическая зависимость;
● - экспериментальные значения

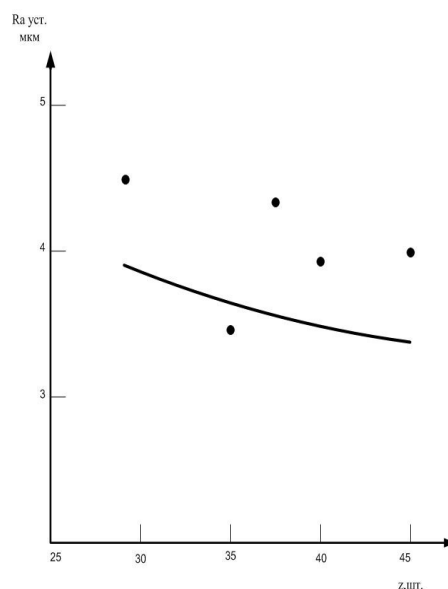


Рис.4 Зависимость установившейся шероховатости поверхности от числа шариков в одном ряду упрочнителя для стали 40ХН2МА:

— - теоретическая зависимость;
● - экспериментальные значения

Сравнительные результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований представлены на рис.3-5.

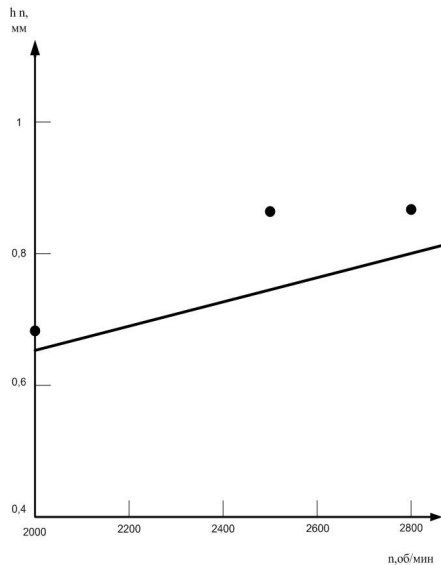


Рис.5 Зависимость глубины упрочненного слоя от различных значений скорости обработки для стали 40ХН2МА:

- - теоретическая зависимость;
- - экспериментальные значения

лей - больший диаметр шариков (14-20 мм).

Затем осуществляется выбор диаметра и количество рядов шариков сепаратора. Для обработки участков детали, где перепад размера большой, используются двухрядные упрочнители. Для более гладких участков количество рядов шариков можно увеличить до пяти, что позволяет увеличить число взаимодействий шариков с поверхностью обрабатываемой детали за один проход упрочнителя. Диаметр упрочнителя для стали рекомендуется брать в районе 200 мм, что позволяет обеспечить достаточную энергию соударения и соответственно степень упрочнения. Число шариков в одном ряду сепаратора рекомендуется брать 35-45. Для более мягких материалов можно уменьшить диаметр упрочнителя до 150 мм. А количество шариков в ряду также уменьшится исходя из конструктивных соображений.

Затем производится расчет среднего арифметического отклонения шероховатости поверхности, степени наклепа и глубины наклепанного слоя по зависимостям (4),(7),(6). При расчетах варьируют значения окружной скорости упрочнителя и натяга обработки при фиксированных значениях продольной подачи и количестве оборотов детали либо поперечной подачи на ход (для невращающейся детали). По результатам расчетов производится корректировка выбранных режимов обработки. Затем вновь рассчитываются параметры качества обработанной поверхности, и так до тех пор, пока все заданные характеристики не будут располагаться в необходимых пределах. Число проходов упрочнителя берется в пределах 3-5,

Анализируя сравнение теоретических зависимостей и результатов экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что погрешность теоретических расчетов не превышает 20%, следовательно, представленные выше теоретические модели являются адекватными и могут быть использованы для прогнозирования результатов центробежной обработки.

Предлагаемая методика проектирования технологических процессов ЦО.

Разработка технологического процесса обработки деталей начинается с выбора размера шариков. Для мягких и средних по твердости материалов рекомендуется меньший диаметр шариков (7-12 мм), для закаленных ста-

по величине продольной подачи и длине детали рассчитывается время обработки по формуле (8).

При наличии нескольких вариантов сочетаний режимов обработки, позволяющих получить заданные характеристики поверхностного слоя, выбирается тот, у которого общее время обработки конкретной детали меньше.

Заключение. В соответствии с разработанными теоретическими моделями процесса ЦО, прошедшими экспериментальную проверку, разработана методика проектирования технологических процессов.

Центробежная обработка может применяться для деталей сложной формы или отдельных их поверхностей с небольшим перепадом высот. Упрочнение осуществляется за счет образования перекрывающих друг друга множества пластических отпечатков. Для получения равномерного упрочнения необходимо, чтобы при каждом следующем соударении обеспечивалось перекрытие не менее половины площади пластического отпечатка, таким образом, поперечная подача упрочнителя $S_0 \leq 0,5d_{ин}$.

Представленные технологические рекомендации были использованы для предложений по корректировке технологического процесса центробежной обработки на ОАО «РОСТВЕРТОЛ».

Библиографический список

1. *Проскуряков Ю.Г.* Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. / Ю.Г. Проскуряков. – М.: Машиностроение, 2002. – 206 с.
2. *Одинцов Л.Г.* Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
3. *Непомнящий Е.Ф.* Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц. / Е.Ф. Непомнящий // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. - М.: Наука, 1971. - С.190-200.
4. *Королёв А.В.* Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. / А.В. Королёв. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 191 с.
5. *Кудрявцев И.В.* Повышение прочности и долговечности крупных деталей машин поверхностным наклепом. / И.В. Кудрявцев, Н.Д.Щербюк, Ю.И.Газанчан. - М. НИИ-ИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. – 144 с.

Материал поступил в редакцию 20.01.09.

J.A.PROSKORJAKOVA

**TECHNIQUE OF DESIGNING
OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF CENTRIFUGAL
PROCESSING**

Article is devoted to research of process of centrifugal processing. Theoretical models are developed for definition of an average arithmetic deviation of a structure of the established roughness, depth of the strengthened layer and a degree of hardening. The technique of designing of technological processes of centrifugal processing is offered.

ПРОСКОРЯКОВА Юлия Анатольевна, соискатель кафедры «Технология машиностроения» ДГТУ. Окончила ДГТУ(1994) по специальности «Станки и инструмент».

Область научных исследований – динамические методы обработки поверхностным пластическим деформированием и виброакустика технологического оборудования.

Имеет 7 научных публикаций.

freundin111@bk.ru